https://doi.org/10.26552/ pas.Z.2025.1.21

UNIVERSITY OF ŽILINA

POROVNANIE EFEKTÍVNOSTY ZÁKLADNÝCH KONCEPCIÍ UAV VZHĽADOM NA PREVÁDZKOVÉ PODMIENKY

Oleksandra Kyrylova
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Robert Dianovský
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Drones are increasingly being used in various fields to simplify and enhance human work. They are utilized for various purposes such as monitoring, mapping, agriculture, rescue operations, inspections, and many other goals. Their growing popularity has led to the need for selecting the appropriate type of drone for specific missions and operational conditions. The goal of this work was to compare the efficiency of the basic UAV concepts in relation to operational conditions, primarily multirotors and fixed-wing UAVs in various operational scenarios. Based on this analysis, a methodological tool in the form of a "Scoring System" was developed to assist users without technical knowledge in selecting the appropriate UAV. The system was designed as a universal tool and tested on two representative UAV concepts of similar size: the DJI Mavic 3 Enterprise (multicopter) and the senseFly eBee X (fixed-wing UAV). The "Scoring System" provides a simple and clear comparison of these drones based on criteria such as flight time, type of activity, accuracy and availability of RTK/PPK, maneuverability, environment, and operational conditions. Finally, a verification form was created, which was filled out by 16 experienced drone pilots to verify the functionality of the "Scoring System" in real-world conditions. The form contained specific scenarios in which the pilots, based on their experience and knowledge, had to select the appropriate type of drone for each task. This process helped confirm that the system is capable of correctly assessing UAV types and providing effective advice even for users without technical knowledge about drones. The results of this work can serve as a basis for further development of similar systems that will facilitate decision-making when selecting UAVs for the general public.

Keywords

fixed-wing UAV, Scoring System, Multicopter, Comparison.

1. Úvod

Bezpilotné letecké prostriedky (UAV) sa v posledných rokoch stali dôležitou súčasťou rôznych oblastí ľudskej činnosti – od mapovania a monitoringu až po záchranné operácie a presné poľnohospodárstvo. Ich dynamický technologický vývoj viedol k vzniku viacerých koncepčných riešení, ktoré sa odlišujú konštrukciou, výkonom a spôsobom využitia. Vzhľadom na širokú škálu dostupných UAV a rozmanitosť prevádzkových scenárov vznikla potreba jednoduchého systému, ktorý by umožnil efektívne rozhodovanie pri výbere vhodného typu dronu.

Práca je zameraná na porovnanie efektívnosti základných koncepcií UAV vzhľadom na prevádzkové podmienky, hlavne multikoptéry a UAV s pevným krídlom pri rôznych scenároch prevádzky. Na základe tejto analýzy bol navrhnutý metodický nástroj vo forme bodovacieho systému, ktorý má za úlohu uľahčiť výber vhodného UAV aj pre používateľov bez technických znalostí. Systém bol navrhnutý ako univerzálny a testovaný na dvoch zástupcoch základných UAV koncepcií: DJI Mavic 3 Enterprise (multikoptéra) a senseFly eBee X (UAV s pevným krídlom).

Pri spracovaní práce boli využité metódy analýzy, porovnanie a vyhodnocovania údajov získaných prostredníctvom formulára. Význam práce spočíva v tom, že vytvára základ pre rozhodovací systém, ktorý môže byť v budúcnosti rozšírený a aplikovaný pri výbere UAV v rôznych oblastiach.

Práca je rozdelená do niekoľkých častí. V úvodných kapitolách sa analyzujú typy UAV a ich technické riešenia. Následne sa zhodnocuje súčasné využitie UAV v praxi a faktory ovplyvňujúce ich výkonnosť. Praktická časť práce spočíva v návrhu metodiky výberu UAV, opísaní bodovacieho systému a porovnaní jeho výsledkov s výstupmi z formulára vyplneného pilotmi dronov. Záver práce obsahuje zhodnotenie funkčnosti systému a návrhy na jeho ďalší vývoj.

2. Typy konnštrukčných riešení UAV

V posledných rokoch sa v rôznych oblastiach zvýšilo používanie bezpilotných leteckých prostriedkov (dronov). Dron je diaľkovo alebo autonómne riadené bezpilotné zariadenie. Moderné drony sa ovládajú ľahko a pohodlné, vďaka čomu boli natoľko populárne, že sa stali dostupnými po celom svete. Bezpilotných leteckých prostriedkov možno rozdeliť do dvoch skupín. Bezpilotné letecké prostriedky s fixnými nosnými plochami a bezpilotné letecké prostriedky s rotujúcimi nosnými plochami. **Tato kapitola sa venuje súčasným vývojom UAV a ich type konštrukcii, a presne o troch populárnych konceptov dronov:** Multikoptéry, UAV s pevným krídlom, Hybridné UAV.

2.1. Mulikoptéry

V súčasnosti je jedným z najpopulárnejších UAV s rotujúcou nosnou plochou **multikoptéry. Máju množstvo výhod, ako je schopnosť** vertikálneho vzletu a pristátia**, dobrú mobilitu, jednoduchú mechanickú konštrukciu a nosnosť. Multikoptéra používa viacero vrtúľ (namiesto jedného listu rotora ako tradičný vrtuľník) na zabezpečenie vztlaku. Okrem toho nemá chvostový rotor (používaný na zabezpečenie kontroly natočenia a proti krútiacemu momentu generovanému pohonom hlavného rotora vrtuľníka).**

Sú rôzne konfigurácii multikopterá: bikoptéry a trikoptéry, kvadrokoptéra, hexakoptéra ,**oktokoptéra.**

2.1.1. Základná konštrukcia Multikoptéry

Multikoptéry máju jednoduchý dizajn a okrem riadiaceho systému pozostáva najmä s daným počtom ramien, elektromotor, vrtúľ, batérie a letový počítač. Rôzne hardvérové komponenty vytvárajú rôzne letové vlastnosti a existuje optimálny dizajn pre každú danú úlohu.

Rám multikoptéry je konštrukcia, ktorá sa zvyčajne skladá z niekoľkých nosníkov, na ktorých sú namontované motory, hlavnej plošiny, na ktorej je umiestnená všetka elektronika, a hornej plošiny, ktorá chráni všetky elektronické komponenty. [1]

Vrtuľa je lopatkové zariadenie, ktoré pracuje vo vzduchu a je poháňané motorom a slúži ako pohon, ktorý premieňa výkon motora na ťah. Keď sa listy vrtule otáčajú, zachytávajú vzduch a vrhajú ho v smere opačnom k pohybu korpusu drona. Pred skrutkou je vytvorená zóna nízkeho tlaku a za skrutkou zóna vysokého tlaku. Na ich ovládanie sa používa tzv. throttle (plyn), vďaka ktorému je možné upravovať rýchlosť a výšku letu. Moderné kamerové drony majú zvyčajne štyri rotorové listy, ktoré umožňujú dronu vykonávať niekoľko pohybov, a to: zatáčanie (yaw), klopenie (pitch), náklon (roll), a plyn (throttle). [2]

Obrázok 1, zdroje [2]

Batéria je zdrojom energie pre akýkoľvek elektromotor používaný pre UAV. Moderné UAV zvyčajne používajú lítium-polymérové (LiPo) batérie. Jeden článok takejto batérie má menovité napätie 3,7 V (plne nabitý článok je 4,2 V a úplne vybitý článok 3 V). [1]

Kolektorový elektromotor je jednoduchý typ motora, ktorý obsahuje rotor s vinutiami, stator s permanentnými magnetmi, kolektor a kefy v kontakte s kolektorom. Napája sa jednosmerným prúdom, pričom zmena napätia mení rýchlosť rotora. Tento motor je lacný a jednoduchý, ale má nižšiu účinnosť, vysoký elektrický šum a krátku životnosť, preto sa využíva hlavne v menších a jednoduchších multikoptérach.

Bezkefkový elektromotor je vysoko účinný a má dlhú životnosť, pretože nemá komutátor ani kefy, čím minimalizuje trenie. Tento motor využíva tri vinutia, z ktorých na dvoch je v každom momente privádzané napätie, zatiaľ čo tretie je vypnuté, čo vytvára rotujúce magnetické pole. Na riadenie otáčania je potrebný špeciálny regulátor otáčok, a rotor je vybavený magnetmi, pričom stator s vinutiami zostáva stacionárny. Bezkefkové motory sa delia na vnútorné (inrunners) a vonkajšie (outrunners) rotory. Pre multikoptéry sa preferujú vonkajšie motory kvôli vyššiemu krútiacemu momentu a absencii potreby redukčného prevodu.

2.1.2. Riadiaca jednotka a ovládanie multikoptéry

Rádiový riadiaci systém UAV sa skladá z vysielača, ktorý používa operátor, a prijímača na palube dronu. Na efektívne ovládanie dronu je potrebné nielen porozumieť jeho konštrukcii, ale aj zvládnuť základné letové pojmy ako zatáčanie, klopenie, náklon a plyn. Väčšina dronov sa riadi pomocou RC ovládačov, ktoré môžu byť vybavené dotykovými displejmi, držiakmi na mobilné zariadenia a vlastnými displejmi pre telemetrické údaje. Ovládače majú dva joysticky na riadenie pohybu dronu a rôzne tlačidlá, ako je tlačidlo na návrat dronu do miesta vzletu, trimovacie tlačidlá na korekciu rovnováhy a tlačidlá na spustenie automatických letových režimov. Okrem toho, ovládače často obsahujú programovateľné tlačidlá C1 a C2, ktoré môžu byť priradené k ľubovoľným funkciám podľa preferencií pilota. Tieto tlačidlá umožňujú rýchly prístup k špecifickým operáciám, ako je napríklad aktivácia špeciálnych letových režimov, zmena nastavení kamery alebo iných kritických funkcií, čím zvyšujú flexibilitu a komfort ovládania dronu. Niektoré ovládače tiež obsahujú indikátor nabitia batérie a tlačidlo viazania zariadenia (binding) na spárovanie s dronom.

2.1.3. Princíp letu Multikoptéry

Multikoptéry lietajú na princípe zdvihu a krútiaceho momentu. Každá vrtuľa vytvára vztlak aj krútiaci moment — ak sa vrtuľa otáča v smere hodinových ručičiek, rameno sa snaží otáčať opačne (tretí Newtonov zákon). Preto sa používajú dve pravotočivé a dve ľavotočivé vrtule, ktoré efekt krútiaceho momentu rušia a umožňujú stabilné vznášanie. Pri lete dopredu predné motory znížia a zadné zvýšia otáčky. Náklon UAV sa vytvára rovnakým spôsobom. Otočenie okolo vertikálnej osi sa dosahuje zvýšením výkonu pravotočivých alebo ľavotočivých motorov podľa smeru otáčania.

2.2. UAV s pevným krídlom

Drony s pevnými krídlami sa líšia dizajnom, aerodynamickou konfiguráciou, účelom a spôsobom vzletu a pristátia.

2.2.1. Konštrukčne vlastnosti UAV s pevným krídlom

Klasické bezpilotné lietadlá s pevnými krídlami (UAV) majú tradičný aerodynamický dizajn podobný konvenčným lietadlám. Ktoré sa skladá s trupu, pevne upevnené krídla a chvostové plochy (zvyčajne klasické alebo v tvare V a T).

Trup

Trup je centrálna časť konštrukcie, ktorá slúži na umiestnenie všetkých kľúčových systémov dronu, vrátane batérií, riadiaceho systému, elektroniky a senzorov. Trup môže byť vyrobený z rôznych materiálov, ako sú uhlíkové vlákna, plasty a kovové zliatiny, aby sa zabezpečila potrebná pevnosť a ľahkosť.

Pevne upevnené krídla

Dron s pevným krídlom môže mať rôzne typy konštrukcií krídel. Najbežnejšou konštrukciou je jednoplošník, ktorý sa vyznačuje jednoduchou konštrukciou, spoľahlivé aerodynamické vlastnosti a nízkym indukovaným odporom v porovnaní s dvojplošníkmi a

trojplošníkmi. V rámci jednoplošníkov existujú rôzne konfigurácie umiestnenia krídel, ako napríklad dolnoplošník, stredoplošník, hornoplošník, a typ „Parasol“. Niektoré drony používajú konfiguráciu „Flying Wing“, čo je plavidlo bez tradičného chvosta. Táto konštrukcia má vysokú aerodynamickú účinnosť, ale vyžaduje komplexný riadiaci systém na zabezpečenie stability počas letu. Existujú aj UAV so zdvíhacím trupom, v ktorom telo dronu vytvára vztlak. To umožňuje zvýšenú účinnosť pri vysokých rýchlostiach, ale robí takéto lietadlá menej vhodnými na krátke vzlety a pristátia. Výber konštrukcie krídla teda závisí od účelu dronu: jednoplošné drony sú vhodné pre dlhodobé misie a prieskum a lietajúce krídlo „Flying Wing“ alebo zdvíhací trup je pre vysokorýchlostné úlohy.

Chvostové plochy

UAV s pevným krídlom ma horizontálny stabilizátor, horizontálna chvostová plocha umiestnená v zadnej časti lietadla. Okrem toho chvostová plocha pomáha regulovať zmeny ťažiska a ťažiska spôsobené zmenami rýchlosti a polohy, alebo pri spaľovaní paliva, pri vypúšťaní nákladu alebo užitočného zaťaženia z lietadla. Chvostová plocha v tvare V je výhodná, pretože tento typ chvosta vytvára menej indukovaný odpor. Na druhej strane integrácia riadenia náklonu a zatáčania je technicky zložitá a vyžaduje si komplexnejší riadiaci systém. Usporiadanie V-chvostov tiež kladie veľké zaťaženie na zadnú časť trupu počas náklonu a vybočenia. Chvostová plocha v tvare T poskytuje hladšie a rýchlejšie prúdenie vzduchu a má presnejšiu kontrolu náklonu . Vertikálne stabilizátory musia byť vyrobené z pevného a tuhého materiálu. T-chvost vyžaduje drahé kompozitné materiály. Ak je krídlo dronu s pevným krídlom v príliš veľkom uhle nábehu, môže blokovať prúdenie vzduchu, ktorý by mal prúdiť cez chvost. [3]

2.2.2. Princíp lietania UAV s pevným krídlom

UAV s pevným krídlom je schopné lietať vďaka vztlaku vytvorenému aerodynamickým tvarom pevného krídla pri pohybe vpred určitou rýchlosťou, ktorého do predný pohyb sa dosahuje rôznymi spôsobmi (spravidla pomocou motora alebo racionálnym využívaním stúpavých prúdov vzduchu. Z tohto dôvodu potrebujú použiť energiu na pohyb vpred a nemôžu sa udržiavať v jednom bode v priestore. Dron s pevným krídlom sa pohybuje dopredu rýchlejšie ako multikoptéra, jeho manévrovanie trvá dlhšie a teda aj samotné monitorovanie oblasti.

2.3. Hybridné UAV (VTOL UAV s pevným krídlom)

Hybridné UAV kombinujú výhody multikoptér a UAV s pevným krídlom. Umožňujú vertikálny vzlet a pristátie (VTOL) ako multikoptéry, no vo vzduchu prechádzajú do energeticky efektívneho letu ako drony s pevným krídlom, čo im umožňuje prekonať väčšie vzdialenosti a dlhšie vydržať vo vzduchu. Dokážu sa aj vznášať na mieste, čo je výhodné pri dohľade, mapovaní či záchranných operáciách. Vďaka tejto všestrannosti sú vhodné na široké spektrum úloh, hoci sú zložitejšie a drahšie ako tradičné UAV. [4]

3. Analýza súčasného stavu riešenej problematiky

Táto kapitola sa zameriava na analýzu oblastí využitia UAV z pohľadu rôznych konštrukčných riešení v rozličných odvetviach. V rámci tejto analýzy sa najskôr stručne predstaví historický vývoj UAV, následne sa popíšu súčasné možnosti ich využitia v rôznych oblastiach a na záver sa vykoná zhodnotenie analýzy súčasného stavu.

3.1. Historický vývoj UAV

História bezpilotných lietadiel sa začala na začiatku 20. storočia s prvými pokusmi o diaľkovo riadené lietadlá. Po prvej svetovej vojne vznikli prvé bezpilotné cvičné lietadlá, ako britský De Havilland Queen Bee. Počas druhej svetovej vojny boli vyvinuté prvé samonavigačné zbrane, ako nemecká raketa V-1. V druhej polovici 20. storočia sa bezpilotné prostriedky ďalej rozvíjali, pričom vznikali experimentálne projekty ako lietajúce vozidlá pre armádu. Dnes majú UAV široké využitie – od vojenských operácií (napríklad MQ-1 Predator) až po civilné oblasti ako poľnohospodárstvo, mapovanie či doručovanie zásielok. [5]

3.2. Súčasne využitie UAV v rôznych oblastiach

V poslednom čase sa UAV (bezpilotné letecké prostriedky) stali veľmi populárnymi v rôznych oblastiach využitia. Kým v minulosti boli UAV prevažne doménou armády na účely prieskumu a bojových operácií, dnes sú neoddeliteľnou súčasťou mnohých oblastí nášho každodenného života – od poľnohospodárstva, cez záchranné zložky, až po dopravu a logistiku.

3.2.1. UAV v hasičských a záchranných operáciách

Bezpilotné systémy výrazne zefektívňujú vyhľadávanie a lokalizáciu požiarov pomocou termokamier. Umožňujú rýchly prehľad o situácii, koordináciu zásahu a plánovanie bezpečných trás. UAV sa využívajú aj na preventívne monitorovanie lesov a pátracie operácie. Drony ako DJI Matrice 300 RTK so senzorom Zenmuse H20T alebo DJI Mavic 3 Thermal kombinujú termovíziu a RGB kameru, poskytujú dlhý čas letu, odolnosť voči nepriaznivému počasiu a prenos obrazu v reálnom čase, čo je kľúčové pre efektívne riadenie zásahu. [6]

3.2.2. UAV v oblasti verejnej bezpečnosti a polícii

Drony sa využívajú na hliadkovanie, monitorovanie území a kontrolu verejného poriadku počas podujatí. Pomáhajú pri vyšetrovaní nehôd, pátraní po nezvestných a koordinácii zásahov. S tepelnou detekciou môžu identifikovať pohyb osôb v tme alebo zlom počasí. Pre tieto účely sa často používajú UAV ako DJI Matrice 30T (s zoom kamerou, širokouhlou a termálnou kamerou) a DJI Mavic 3 Enterprise Thermal (kompaktný a rýchlo nasaditeľný). Tieto drony umožňujú efektívne sledovanie a rýchlu reakciu v náročných podmienkach, čo ich robí ideálnymi pre bezpečnostné zložky. [6]

3.2.3. UAV v lesníctve a ochrane životného prostredia

Drony umožňujú sledovať rozsiahle lesné územia, detegovať požiare, monitorovať nelegálnu ťažbu dreva alebo zakladanie ohňov. Multispektrálne snímanie pomáha pri diagnostike zdravotného stavu stromov, zisťovaní výskytu škodcov a vyhodnocovaní vývoja vegetácie. UAV sa používajú aj na mapovanie územia a sledovanie ohrozených druhov živočíchov. Na tieto účely sa často využívajú drony ako senseFly eBee X,

ktorý vďaka svojej výdrži a možnosti nesenia multispektrálnych alebo termálnych senzorov umožňuje efektívne monitorovanie rozsiahlych a ťažko dostupných oblastí. Tiež je obľúbený DJI Mavic 3 Multispectral, ktorý je špeciálne navrhnutý na analýzu vegetácie a presné poľnohospodárske či lesnícke aplikácie. Vďaka týmto UAV možno získať cenné dáta bez nutnosti fyzickej prítomnosti v teréne, čo zvyšuje efektivitu a bezpečnosť pri monitorovaní environmentálnych podmienok a ochrane prírody. [6]

3.2.4. UAV v geodézii a mapovaní

Bezpilotné letecké prostriedky (UAV) zásadne zmenili geodéziu a mapovanie tým, že umožňujú rýchly, efektívny a presný zber dát. Využívajú technológie ako LIDAR na tvorbu detailných 3D modelov terénu, čo je užitočné pri stavbe infraštruktúry, monitorovaní zmien krajiny či vyhľadávaní nelegálnych stavieb. Drony s pevným krídlom (napr. senseFly eBee X, WingtraOne) sú ideálne na mapovanie veľkých oblastí, zatiaľ čo multikoptéry (napr. DJI Matrice 300 RTK) sa používajú na detailné snímanie v ťažko prístupných alebo urbanizovaných lokalitách. [6]

3.3. Zhodnotenie analýzy súčasného stavu

Na základe analýzy rôznych oblastí využitia UAV je zrejmé, že správny výber typu bezpilotného prostriedku je kľúčový pre efektívne a bezpečné vykonanie misie. Každá aplikácia – od geodézie a záchranných operácií až po poľnohospodárstvo či logistiku – kladie odlišné požiadavky na výdrž batérie, dolet, nosnosť, senzory, manévrovateľnosť a odolnosť voči počasiu. UAV s pevným krídlom sú ideálne na veľkoplošné mapovanie, zatiaľ čo multikoptéry excelujú v členitom teréne a na obmedzených priestoroch. Nesprávna voľba UAV môže viesť k neefektívnemu zberu dát alebo k zlyhaniu misie. Preto je nevyhnutné prispôsobiť výber konkrétnym podmienkam, cieľom operácie a technickým požiadavkám.

4. Vplyv prevádzkových podmienok na lety UAV

Pri plánovaní UAV misie je kľúčové zohľadniť prevádzkové prostredie – počasie, terén, letový priestor a čas letu – pretože výrazne ovplyvňujú výkon UAV, výber platformy aj letový plán. Každý typ UAV má svoje výhody a obmedzenia, preto je dôležité systematicky porovnávať možnosti. Na tento účel bude v ďalšej časti predstavený bodovací systém na výber vhodného typu UAV podľa praktických kritérií. [7]

4.1. Vplyv počasia a klimatických podmienok

Poveternostné podmienky ako vietor, dážď, hmla, teplota či elektromagnetické poruchy majú veľký vplyv na let UAV. Nepriaznivé počasie môže znížiť stabilitu, skrátiť výdrž batérie, zhoršiť navigáciu a poškodiť zariadenie. Multikoptéry vynikajú v prostredí so zníženou viditeľnosťou a v náročnom teréne vďaka schopnosti vznášať sa a rýchlo pristáť. UAV s pevným krídlom sú vhodnejšie na lety pri silnom a trvalom vetre vďaka lepšej aerodynamike. Pri veľmi nepriaznivých podmienkach (silné búrky, intenzívne zrážky) sa odporúča let zrušiť, pričom dôležitá je aj certifikácia UAV na let v náročnom prostredí.

4.2. Typ činnosti

Výber vhodného typu UAV závisí od charakteru činnosti, konfigurácie, prevádzkových požiadaviek a prostredia. UAV s pevným krídlom sú ideálne na mapovanie a monitorovanie veľkých území vďaka dlhému doletu a času letu, pričom umožňujú efektívne snímanie a tvorbu ortofotomáp. Naopak, multikoptéry vynikajú flexibilitou pri sledovaní objektov v zložitom teréne, pri záchranných operáciách (SAR) a priemyselných inšpekciách v blízkosti infraštruktúry. V poľnohospodárstve sa multikoptéry využívajú na cielené postrekovanie a detailný monitoring plodín, zatiaľ čo UAV s pevným krídlom na rýchly zber dát z veľkých polí. Vo videografii dominujú multikoptéry vďaka stabilite a presnému ovládaniu pri nízkych letoch. Správna voľba UAV je kľúčová pre efektívny a bezpečný výsledok.

4.3. Prostredie

Jedným s kľúčových faktorov pri výbere dronu je prostredie, v ktorom má UAV operovať. Multikoptéry sú ideálne pre zložité alebo obmedzené priestory, ako sú mestské uličky, husté lesy či horské oblasti, vďaka schopnosti vertikálneho vzletu, pristátia a presného manévrovania. Naopak, drony s pevným krídlom majú výhodu vo veľkých otvorených priestoroch, ako sú polia, púšte alebo pobrežia, kde efektívne pokrývajú rozsiahle územia s nízkou spotrebou energie. Ich využitie je však obmedzené v úzkych alebo zastavaných oblastiach.

4.4. Vzlet a pristátie

Ako vyplýva z kapitoly „Typ konštrukčného riešenia UAV“, hlavný rozdiel medzi multikoptérami a UAV s pevným krídlom spočíva v spôsobe vzletu a pristátia. Multikoptéry vynikajú schopnosťou vertikálneho vzletu a pristátia (VTOL), čo im umožňuje operovať aj z obmedzených alebo nerovných plôch. Táto flexibilita je výhodná najmä v mestskom prostredí, v horských oblastiach či pri operáciách, ktoré vyžadujú rýchle nasadenie a stiahnutie dronu. UAV s pevným krídlom naopak väčšinou potrebujú rovnú a dlhšiu vzletovú dráhu, prípadne pomoc katapultu, a pri pristátí využívajú zachytávacie systémy alebo klzné pristátie. Tieto nároky ich obmedzujú na otvorené priestory, ako sú polia, lúky alebo veľké letecké zóny.

4.5. Čas letu

Jedným z dôležitejších parametrov pri výbere vhodného UAV je **dĺžka trvania letu**, ktorá priamo súvisí s energetickou efektivitou zariadenia. **UAV s pevným krídlom** sú v tomto smere výrazne efektívnejšie vďaka svojmu aerodynamickému tvaru a schopnosti kĺzavého letu bez potreby neustáleho aktívneho vztlaku. **Komerčné modely UAV s pevným krídlom** s hmotnosťou do 2 kg (napr. **senseFly eBee X**) sú schopné dosahovať letové časy v rozmedzí **60 až 90 minút**, v závislosti od konfigurácie, senzora a poveternostných podmienok. Vyspelé profesionálne alebo vojenské platformy môžu vo vzduchu zotrvať aj **viac ako 10 hodín**. Táto vlastnosť ich predurčuje na **dlhodobé snímkovanie, monitoring rozľahlých území či geodetické úlohy**, kde je nepretržité pokrytie a kontinuita letu kľúčová. Naopak**, multikoptéry,** ako je napríklad **DJI Mavic 3 Enterprise,** majú **čas letu obmedzený do 45 minút.** Tento kratší čas je spôsobený tým, že celú hmotnosť dronu musí neustále

niesť niekoľko rotorov, ktoré udržiavajú zariadenie vo vzduchu prostredníctvom trvalého vztlaku. [8] [9]

4.6. Manévrovateľnosť

Pri porovnaní manévrovateľnosti medzi multikoptérami a UAV s pevným krídlom majú výraznú výhodu multikoptéry. Vďaka svojej konštrukcii s viacerými rotormi, ktoré umožňujú pohyb vo všetkých smeroch a schopnosť vznášať sa na mieste, sú extrémne flexibilné. Táto vlastnosť zaručuje vysokú presnosť manévrovania a kontrolu, čo je kľúčové pri operáciách vyžadujúcich priblíženie k objektom alebo navigáciu v zložitých podmienkach, ako sú úzke mestské uličky, interiéry budov, blízkosť infraštruktúrnych prvkov či členitý terén. Naopak, UAV s pevným krídlom sú navrhnuté pre stabilný a plynulý let pri vyšších rýchlostiach a na väčšie vzdialenosti. Ich manévrovateľnosť je obmedzená väčším polomerom zatáčania a potrebou rozsiahlejšieho priestoru na zmenu smeru alebo výšky letu.

4.7. Navigácia, presnosť a dostupnosť RTK/PPK

Navigačný systém UAV zabezpečuje presnú lokalizáciu, orientáciu a stabilné diaľkové riadenie. GPS ponúka vysokú presnosť v reálnom čase, GNSS zahŕňa viacero systémov (GPS, GLONASS), čím zvyšuje spoľahlivosť určovania polohy. INS sleduje pohyb UAV pomocou gyroskopov a akcelerometrov bez satelitného signálu, ale trpí "driftom" . Kombinácia GNSS a INS je dnes najspoľahlivejšia – GNSS poskytuje polohu, INS orientáciu aj pri výpadku signálu. RTK (Real-Time Kinematics) umožňuje korekcie GNSS údajov v reálnom čase s presnosťou 1–2 cm, vhodné pre oblasti s dobrým signálom. PPK (Post-Processing Kinematics) zaznamenáva údaje počas letu a spracúva ich neskôr, pričom dosahuje rovnakú presnosť ako RTK a je spoľahlivejší v zložitých podmienkach. [10]

5. Návrh metodiky výberu typu UAV

V praktickej časti práce bol vytvorený jednoduchý bodovací systém na výber vhodného UAV pre používateľov bez technických znalostí. Systém je navrhnutý ako univerzálny a testovaný na dvoch zástupcoch základných UAV koncepcií: multikoptérá DJI Mavic 3 Enterprise a UAV s pevným krídlom senseFly eBee X. Hybridné UAV neboli zahrnuté kvôli ich špecifickým vlastnostiam. Systém hodnotí UAV podľa kategórií: typ činnosti, klimatické podmienky, presnosť a dostupnosť RTK/PPK, prostredie, vzlet a pristátie, čas letu a manévrovateľnosť.

5.1. Bodovací system

Systém hodnotí UAV na základe kategórií a podkategórií, ktoré zohľadňujú hlavné faktory ovplyvňujúce ich efektívnosť. Hodnotenie prebieha podľa škály:

- **2 body** – UAV je ideálny pre dané použitie, efektívny a spoľahlivý.
- **1 bod** – UAV je použiteľný, ale s určitými obmedzeniami.
- **0 bodov** – UAV je nevhodný pre danú situáciu.

Body sa spočítajú a UAV s vyšším počtom bodov je považovaný za vhodnejší.

		Multikopter	UAV s pevným krídlom
Kategórie	**Možnosť**	DJI Mavic 3 Enterprise	senseFly eBee X
1. Typ činnosti	Mapovanie	2	2
	Monitorovanie	2	2
	Vyhľadávanie a záchrana (SAR)	2	1
	Priemyselné inšpekcie	2	2
	Poľnohospodárstvo	2	2
	Videografia	2	1
2. Prostredie	Polia	2	2
	Lesy	1	2
	Veľké miestá	2	0
	Úzke uličky	2	0
	Stavby / vysoké budovy	2	0
	Skalnaté terény	2	1
	Zalesnené oblasti v horách	1	2
	Jazerá, rieky	2	2
	Moria a oceány	2	2
3. Vzlet a pristátie	Z pevnej plochy (štrkové, asfaltové plochy)	2	2
	Vertikálny vzlet a pristátie (VTOL)	2	0
	Možnosť vzletu z obmedzených plôch	2	0
4. Čas letu	< 45 minút	2	1
	45–90 minút	0	2
	> 90 minút	0	0
5. Manévrovateľnosť	Vznášanie sa	2	0
	Kruhový let nad bodom	1	2
	Vysoká presnosť dát (GSD Mapping)	2	1
	Dlhodobé pozorovanie jedného bodu	1	1
6. Počasie a klimatické podmienky	Dážď	1	1
	Vietor	1	2
	Teplota	2	2
	Sneh / zamrznuté podmienky	1	2
	Nízka viditeľnosť / hmla	1	2
	Búrky a blesky	0	0
	Vlhkosť	1	1
7. Presnosť a dostupnosť RTK/PPK	Dostupnosť pre presné geodetické merania RTK/PPK	2	2
	Snímanie bez RTK/PPK (pri nízkej presnosti)	1	1

Obrázok 2 “Bodovací systém“

5.2. Opis UAV zariadení vybraných na analýzu a porovnanie

DJI Mavic 3 Enterprise a senseFly eBee X sú vhodné na mapovanie a monitorovanie vďaka vysokej kvalite snímok a presnému RTK/PPK geolokačnému systému. Pri pátracích a záchranných operáciách má multikoptéra výhodu v schopnosti vznášať sa a rýchlo reagovať, zatiaľ čo eBee X je efektívnejší pri pokrývaní veľkých oblastí. V priemyselných inšpekciách sú oba systémy dobre využiteľné: Mavic 3 lepšie funguje v stiesnených priestoroch, eBee X pri väčších plochách. Pri videografii jednoznačne vedie multikoptéra vďaka možnosti stabilného natáčania z miesta. V otvorených priestoroch sú obe platformy rovnocenné, no v mestách a úzkych priestoroch má výhodu Mavic 3 Enterprise. V lesoch a horských oblastiach sa naopak lepšie uplatní pevné krídlo. Pri vzlete a pristátí zo stiesnených plôch má prevahu multikoptéra, ktorá zvláda vertikálny štart, zatiaľ čo eBee X potrebuje viac priestoru. V čase letu má eBee X výhodu (až 90 minút oproti 45 minútam pri Mavic 3), čo je dôležité pre rozsiahle misie. V oblasti manévrovateľnosti vyniká multikoptéra možnosťou vznášania sa a presného sledovania bodu, pričom eBee X vykonáva kruhové prelety. Za veterného počasia je stabilnejšie pevné krídlo, ale ani jeden z dronov nie je vhodný na dážď alebo búrky. Oba UAV ponúkajú vysokú pozičnú presnosť vďaka RTK/PPK technológiám. Na základe týchto poznatkov bol vytvorený univerzálny bodovací systém na výber optimálneho drona pre rôzne misie. [9] [8]

5.3. Limitácie systému

Systém navrhnutý na výber vhodného UAV má svoje limitácie, pretože porovnáva iba dve základné koncepcie (multikoptéry a pevné krídlo), čo nemusí pokryť všetky špecifické požiadavky. Určité faktory, ako manévrovateľnosť pri vznášaní sa, vzlet a pristátie, čas letu, užitočné zaťaženie alebo potreba RTK/PPK

presnosti, môžu spôsobiť, že odporúčaný dron nie je vhodný pre konkrétnu misiu. Systém je určený ako pomocný nástroj pre orientáciu, nie ako univerzálne rozhodovacie riešenie.

5.4. Názorne použitie bodovacieho systému

Pre lepšie pochopenie fungovania bodovacieho systému uvádzame názorný príklad jeho využitia v praxi, ktorý ukazuje, ako systém pomáha pri výbere vhodného typu UAV.

Scenár 1. Predstavme si situáciu, kde je potrebné vykonať monitorovanie poľnohospodárskej oblasti. Zákazník požaduje vytvorenie ortofotomapy a NDVI analýzy (Normalized Difference Vegetation Index) pre 300-hektárové pole s mierne zvlneným terénom. Cieľom je získať presné dáta o stave vegetácie, ktoré budú využité na plánovanie zavlažovania a hnojenia. Požiadavky zákazníka: efektívne pokrytie veľkého územia v čo najkratšom čase, základná odolnosť voči miernemu vetru, dlhy čas letu, a presnosť výstupu.

		Multikopter	UAV s pevným krídlom
Kategórie	**Možnosť**	DJI Mavic 3 Enterprise	senseFly eBee X
1. Typ činnosti	Mapovanie	2	2
	Monitorovanie	2	2
	Vyhľadávanie a záchrana (SAR)	2	1
	Priemyselné inšpekcie	2	2
	Poľnohospodárstvo	2	2
	Videografia	2	1
2. Prostredie	Polia	2	2
	Lesy	1	2
	Velké miestá	2	0
	Uzke uličky	2	0
	Stavby / vysoké budovy	2	0
	Skalnaté terény	2	1
	Zalesnené oblasti v horách	1	2
	Jazerá, rieky	2	2
	Moria a oceány	2	2
3. Vzlet a pristátie	Z pevnej plochy (štrkové, asfaltové plochy)	2	2
	Vertikálny vzlet a pristátie (VTOL)	2	0
	Možnosť vzletu z obmedzených plôch	2	0
4. Čas letu	< 45 minút	2	1
	45–90 minút	0	2
	> 90 minút	0	0
5. Manévrovateľnosť	Vznášanie sa	2	0
	Kruhový let nad bodom	1	2
	Vysoká presnosť dát (GSD Mapping)	2	1
	Dlhodobé pozorovanie jedného bodu	1	1
6. Počasie a klimatické podmienky	Dážď	1	1
	Vietor	1	2
	Teplota	2	2
	Sneh / zamrznuté podmienky	1	2
	Nízka viditeľnosť / hmla	1	2
	Búrky a blesky	0	0
	Vlhkosť	1	1
7. Presnosť a dostupnosť RTK/PPK	Dostupnosť pre presné geodetické merania RTK/PPK	2	2
	Snímanie bez RTK/PPK (pri nízkej presnosti)	1	1
		18	20

Obrázok 3 Názorne použitie bodovacieho systemu scenár 1

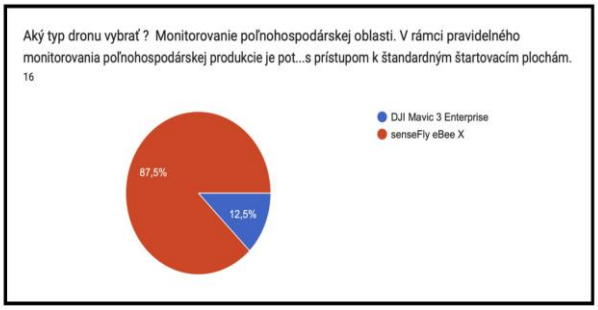
Na základe výsledkov bodovacieho systému možno konštatovať, že senseFly eBee X UAV s pevným krídlom je pre túto misiu vhodnejšou voľbou.

5.5. Porovnanie výsledkov s navrhnutého systému s výsledkami formuláru

Na overenie funkčnosti a praktickej použiteľnosti vytvoreného bodovacieho systému bol navrhnutý formulár, ktorý obsahoval 10 konkrétnych prevádzkových situácií. Tento formulár bol následne zaslaný 16 skúseným pilotom dronov, ktorí na základe svojich odborných znalostí a praktických skúseností vybrali najvhodnejší typ UAV pre každú situáciu. Výsledky ich rozhodnutí boli následne porovnané s odporúčaniami navrhnutého bodovacieho systému. Cieľom bolo overiť, či systém dokáže poskytnúť rovnaké odporúčania ako odborníci z praxe, a tým potvrdiť jeho spoľahlivosť a prínos pre používateľov bez hlbších technických znalostí.

5.5.1. Výsledky

Pri porovnaní výsledkov bodovacieho systému s odpoveďami pilotov môžeme na obrázku 4 vidieť, že skúsení piloti dronov vo väčšine prípadov zvolili rovnaký typ UAV, ako odporučil bodovací systém. Menšie percento pilotov však uviedlo, že by v danom scenári bolo možné použiť aj DJI Mavic 3 Enterprise. Čisto teoreticky je to možné, pretože DJI Mavic 3 Enterprise poskytuje dostatočné rozlíšenie pre NDVI analýzy, podporuje RTK pre presné mapovanie a je ľahko ovládateľný. Na rozdiel od senseFly eBee X však nie je schopný pokryť celé 300-hektárové územie v jednom lete kvôli kratšiemu letovému času.



Obrázok 4 Výsledok s formuláru, scenár 1

Ostatných 9 výsledkov získaných prostredníctvom formulára a porovnaných s odporúčaniami „Bodovacieho systému“ sú uvedené v Prílohe A. Tieto porovnania slúžia ako dôkaz funkčnosti systému. Výsledky ukázali, že navrhnutý systém dokáže efektívne a presne hodnotiť vhodnosť UAV v rôznych reálnych prevádzkových scenároch. Zhodnosť výstupov systému s odporúčaniami skúsených pilotov potvrdzuje, že metodika založená na kľúčových prevádzkových parametroch je spoľahlivá a prakticky použiteľná aj pre používateľov bez technických znalostí. Na základe všetkých prípadov v Prílohe A môžeme povedať, že bodovací systém sa ukázal ako správny a prakticky využiteľný. Keď bol rozdiel v bodoch medzi multikoptérou a dronom s pevným krídlom malý, názory pilotov sa niekedy líšili. Pri veľkom bodovom rozdiele (napr. v Scenári 3: 16 vs. 6 bodov) sa však všetci piloti zhodli na rovnakom type UAV. To potvrdzuje, že bodovací systém je spoľahlivý a objektívny.

6. Záver

Cieľom tejto práce bolo porovnanie efektívnosti základných koncepcií UAV vzhľadom na prevádzkové podmienky, hlavne multikoptéra a UAV s pevným krídlom pri rôznych scenároch prevádzky. Ako návrh metodiky výberu typu UAV bol vytvorený „Bodovací systém“, ktorý umožňuje jednoduchý výber vhodného typu UAV aj používateľom bez technických znalostí. Systém je navrhnutý ako univerzálny nástroj na porovnanie akýchkoľvek dronov, ktoré sú veľkostne a koncepčne podobné. Na demonštráciu funkčnosti systému boli vybrané dve populárne koncepcie dronov – multikoptéra DJI Mavic 3 Enterprise a UAV s pevným krídlom senseFly eBee X.

Nasledovne bol vytvorený „Bodovací systém“, ktorý pri výbere typu UAV zohľadňuje kľúčové prevádzkové faktory, ako sú typ činnosti, letové podmienky, manévrovateľnosť, presnosť a dostupnosť RTK/PPK, prostredie a čas letu. **Hybridné UAV neboli zahrnuté do Bodovacieho systému,** pretože ich

konštrukcia kombinuje vlastnosti multikoptéra aj UAV s pevným krídlom, čo môže skresľovať porovnanie. Cieľom bolo vytvoriť jednoduchý systém založený na dvoch jasne odlíšiteľných koncepciách – multikoptéra a UAV s pevným krídlom. Hybridné drony predstavujú samostatnú kategóriu so špecifickými výhodami aj obmedzeniami (napr. vyššia cena, zložitejšia údržba či špecializované použitie), preto by si vyžadovali osobitné kritériá hodnotenia.

Na overenie funkčnosti a praktickej použiteľnosti vytvoreného „Bodovacieho systému" bol navrhnutý formulár (overenie správnosti navrhovaného systému), v ktorom boli znázornené 10 konkrétnych prevádzkových situácii. Formulár bol následne zaslaný 16 skúseným pilotom dronov, ktorí mali na základe svojich odborných znalostí a praktických skúseností určiť najvhodnejší typ UAV pre každú situáciu. Následne výsledky boli porovnane s výsledkami navrhnutého „Bodovacieho systému". Cieľom bolo zistiť, či systém dokáže navrhnúť rovnaký výsledok ako odborníci z praxe, a tým potvrdiť jeho spoľahlivosť a prínos pre používateľov bez technických znalostí.

Dôležite je vedieť, že systém funguje len keď porovnávame dva veľkostne podobné drony. Dôvodom je to, že rôzne kategórie dronov (napríklad mikro UAV vs. veľké priemyselné systémy) majú odlišné technické parametre, výbavu a účel použitia, ktoré sa nedajú spravodlivo porovnať rovnakým súborom univerzálnych kritérií.

Práca zároveň otvára priestor pre ďalší vývoj systému, jeho rozšírenie o ďalšie typy UAV, či zohľadnenie špecifických úloh v rôznych oblastiach. Získané výsledky a navrhnutá metodika môžu slúžiť ako základ pre budúce výskumy a prispieť k širšiemu a efektívnejšiemu využívaniu UAV v praxi.

Referencie

[1] E. Standard, 2022. [Online]. Available: https://brlab.gitbook.io/edu-ard/edu.ard-standart/opisanie-1.

[2] Aerium, „Návod na ovládanie dronu krok za krokom – naučte sa lietať ako skutoční experti," 2023. [Online]. Available: https://www.aerium.sk/navod-na-ovladanie-dronu.

[3] U. Coach, „Fixed Wing Drones: A Comprehensive Guide for Drone Pilots [New for 2025]," 2025. [Online]. Available: https://www.dronepilotgroundschool.com/fixed-wing-drones/.

[4] S. N. Link, „Design of a Commercial Hybrid VTOL UAV System," 2013. [Online]. Available: https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-013-9900-0.

[5] ANO Center SRPN, „History of creation and development of unmanned aerial vehicles," 2023. [Online]. Available: https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-sozdaniya-i-razvitiya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov.

[6] BRLAB, „Drones for inspection of power lines and power line supports," 2024. [Online]. Available: https://brlab.ru/scopes/monitoring-liniy/.

[7] DRONCENTRUM, „Kvadrokoptéry vs. hexakoptéry vs. oktokoptéry: Pro a proti," 2016. [Online]. Available: https://www.droncentrum.cz/kvadrokoptery-vs-hexakoptery-vs-oktokoptery-pro-a-proti/?action=detail.

[8] AgEagle, „eBee X Series," 2024. [Online]. Available: https://ageagle.com/drones/ebee-x/.

[9] d. Enterprise, „Specs," 2024. [Online]. Available: https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs.

[10] B. Z. Wenling Li, „An Enhanced, Real-Time, Low-Cost GNSS/INS Integrated Navigation Algorithm and Its Platform Design," 2025. [Online]. Available: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11991159/.